リニアアクセラレータの発射性能の安定化と 飛翔体の発射速度向上

正員 海老原 大 樹 (武蔵工大)

正員 和多田 雅 哉 (武蔵工大)

准員 長 嶋 健 二 (武蔵工大)

Improvement in Stabilization of Launching Performance and Launching Velocity using Linear Accelerator

Daiki Ebihara, Member, Masaya Watada, Member, Kenji Nagashima, Associate (Musashi Institute of Technology)

This paper describes the improvements in launching stability and launching velocity of the linear accelerator (LAC).

The authors have designed and produced a railgun using the LAC for weaving loom shuttles. The LAC is an electromagnetic launcher which enable a projectile to be launched at a speed of more than 50 m/s. It basically consists of an uni-pole linear DC motor and operates the same principle as DC rotary motors, the most difficult problem in this system being the stabilization of the current collection on the projectile.

Then we have conducted the various launch experiments. As a result, we have achieved that the carbon projectile was launched at a speed of 73 m/s using double-stage type LAC.

キーワード：レールガン，リニア直流モータ，織機用シャトル，飛翔体

1. ま え が き

リニアモータを利用した加速装置に関する研究は、かなり古くから試みられてきた。1890年代には、既にアメリカでリニア誘導モータを利用した織機用シャトルに関する研究が行われていた⁽¹⁾。日本でも、1934年に旧陸軍科学研究所において、軍事利用を目的とした電気砲の研究が行われていた⁽²⁾。現在では、平和利用を目的とした宇宙ロケットの打上げ装置への応用⁽³⁾、核廃棄物の宇宙空間への射出用ランチャへの応用、リニア誘導モータを利用した織機用シャトルへの応用⁽⁴⁾など幅広い分野で研究が試みられている。また、レールガンを利用し、物体を秒速数 km の超高速に加速し、他の物体と衝突させ、物質内部を瞬間的に超高压高温状態にし、新しい金属を作り出すという衝突核融合の研究も行われている^{(5)~(7)}。

このような状況をふまえ、著者らは、織機用シャトルへの応用を目指し、リニアアクセラレータ (Linear accelerator; LAC) を用いた瞬時加速装置に関する研究を行ってきた^{(8)~(12)}。この織機用シャトルとは、織機のよこ糸をシャトルにより打ち込んでいくものであり、リニアモータを利用した際には、機幅・打込み周期・よこ糸数などの条件のほか、質量 100 g のシャトルを速度 50 m/s で加速されることが要求されるといわれている⁽¹⁾。この目的に対して、ソレノイド形電磁ランチャを利用する方式の提案もあるが⁽¹³⁾、著者らはより現実性を考慮し、原理を異にする方式について検討を加えた。

本 LAC は、単極形リニア直流モータを基本構造とした導電型加速装置であるが、この方式の最大の問題点は、飛翔体への集電の安定化である。従って、集電が不安定であると、飛翔体の不安定な発射や発射速度

の低下につながると考えられる。現在、研究開発されている導電型加速装置の大部分は発射ごとに集電レールの交換を余儀なくされたり、飛翔体の再利用が不可能といった状況である。また、再発射にはかなりの時間を必要としている。一般産業への応用を考慮するとレール・飛翔体の繰返し利用や、サイクルタイムの短縮は重要な条件である。そこで、この問題点を解決すべく、主に、接触部材の種類・構造などの各種改良を行った。その結果、安定発射の条件をほぼ把握するに至った⁽⁸⁾⁽¹¹⁾。

しかしながら、織機用シャトルへの応用を考えると、要求仕様であるシャトルの発射速度 50 m/s を満足しておらず、さらなる発射速度の向上が望まれる。この対策として、著者らは、飛翔体への放電電流波形に関する検討と多段階方式について検討を行った。

本論文では、まず LAC の基本構造とその動作原理について述べる。次に、飛翔体の材質変更による LAC の性能安定化に対する検討を述べ、更に、放電電流波形および多段階加速型 LAC による発射速度向上に対する検討結果について述べる。最後に、これら実験結果を基に、多段階加速型 LAC の織機用シャトルへの有効性についての検討を行う。

2. LAC の基本構造および動作原理

本 LAC の動作原理は、回転形直流モータと同様、磁界と導体電流との間に働く力を利用したものであり、他のリニアモータに比べ、単位体積当たりの推力が高いという特徴をもっている⁽¹⁴⁾。

実験装置の基本回路は図 1 に示されるように、 $R-L-C$ 直列回路である。実験を行う際には、直流電源によりコンデンサ C を十分に充電した後、スイッチを切り換え、コンデンサに蓄えられた電荷をコイル L を通して放電させる。このとき、飛翔体には永久磁石により作用している磁界と、飛翔体を流れる電流から、フレミングの左手則を満足するような方向に推力が発生し加速され発射する。図中の R_L はコイル抵抗、 R_s は電流波形検出用抵抗である。

図 1 実験装置の基本回路
Fig. 1. Experimental circuit.

発射装置の片側断面図を図 2 に示したが、Sm-Co 系希土類磁石による磁気回路と、飛翔体に大電流を通電するための集電レール部から構成されている。磁気回路には、飛翔体の駆動に必要なギャップ g を設けてあり、ギャップ中の下方から上方へ磁束が供給されている。また、飛翔体への電流は、両側にそれぞれ 2 本のカーボン製集電レールを配し、飛翔体へ電流の安定

図 2 発射装置の片側断面図
Fig. 2. Cutaway view of LAC.

表 1 実験装置の諸量
Table 1. Specifications of LAC.

Mechanical		
Items		Values (Unit)
Launcher	Size	170 × 90 × 150 mm
	Rail length	150 mm
	Rail material	Carbon
	Gap length	9 mm
	Flux density	0.6 T
Projectile	Material	Carbon and Aluminium
	Size	48.6 × 3.62 × 22 mm
	Mass	6.86 g 5.5 g
Electrical		
Items		Values (Unit)
Circuit resistance		28.5 ~ 46.5 mΩ
Capacitance/Withstand voltage		38/350 mF/V
Inductance of coil		240 μH
Supply voltage		0 ~ 350 V

供給を行っている。

実験機の寸法諸量を表1に示す。

3. LACの発射性能の安定化

本システムは単極形リニア直流モータを基本構造とした導電型加速装置であり、この方式の最大の問題点は、飛翔体への集電の安定化である。すなわち、瞬時に数千Aの大電流をレールを通して飛翔体に供給するために、レール・飛翔体双方とも電流密度および発熱による溶融を考慮しなければならない。レールに関する基礎実験は、レールの材質と配置の面から検討した。

まずレールの材質について、黄銅とカーボンを選択し実験を行ったが、黄銅レールは発射実験ごとに大電流放電の溶融の痕跡があり、レールの補修または交換を必要としたばかりでなく、発射速度のばらつきが多かった。これに対し、カーボンレールでは、放電による補修の必要性はなく、発射速度も安定であることからカーボンレールに決定した。また、レールの配置については、飛翔体の高速移動に起きる浮上などに起因する接触状態の確保の面から検討を必要とした。単レール上に飛翔体を滑らせるときは、浮上などによる非接触状況になりやすいため、板ばねによる飛翔体の強制接触や、飛翔体の上下にレールを配置して常にどちらかが接触を維持する方式などにつき検討した。しかし、飛翔体、レール間の摩擦の軽減は発射速度の向上に必要であり、後者の方式をとった。また、これらの良否の判断は、放電電流波形の観測から非接触状況を、発射速度の計測から発射特性を測定し行った。放電電流波形は図1の検出用抵抗の両端電圧波形をストレージョシロスコープ（岩崎通信機製、DS-6612C）で収録し、X-Yレコーダ（理研電子製、F-42DG）で記録した。

一方、飛翔体の材質については、当初、黄銅、アルミニウムについて検討していたが、発射の安定性や速度の面から黄銅は飛翔体質量の増加や、放電電流による溶融の面で問題があり、実用を考慮した実験では、アルミニウムとカーボンで比較を行った。ここに、アルミニウムとカーボンの基本特性値を表2に示した。アルミニウムは、導電率が高く、加工が容易で軽量化しやすいという利点をもつ一方、融点が高いという欠点をもつ。これに対し、カーボンは導電率は低いものの融点が高いという利点をもつ。

ここに、実験によるアルミニウム製飛翔体およびカーボン製飛翔体を用いた場合の発射速度計測結果を表3に示した。本実験でのLACの諸量は表1に示した値であり、電源電圧は300Vである。なお、測定方

表2 アルミニウムとカーボンの特性値
Table 2. Specifications of aluminium and carbon.

Items	Aluminium	Carbon
Mass (g)	5.5	6.86
Melting Point (°C)	660	3,700
Resistivity (nΩ·m)	27.5	13,500

図3 発射速度計測システム

Fig. 3. Measurement system of velocity.

法は光ファイバセンサを用い、2点間を飛翔体が通過した時間より求めた。この計測システムの構成を図3に示した。センサには、光ファイバ方式の拡散反射形光電スイッチ（オムロン製 形E32-DC200F）2個を使用した。飛翔体が前段センサを通過したときから基本クロックパルス（16MHz）のカウンタを開始し、後段センサを通過したところでカウンタを終了する。この16ビットのカウンタ回路のカウンタ値は、I/Oボードを介してコンピュータ（NEC製PC-9801）に収録し、速度の計測を行っている。この際の速度に換算した誤差は、83.3m/sのとき最大で5%であり、これ以下の速度では、ほぼ速度に比例して減少する。

両者を比較すると、同一エネルギーを投入しているにもかかわらず、アルミニウム製飛翔体のほうが発射速度が速くなっている。これは、アルミニウム製飛翔体のほうが質量が軽く、更に、抵抗値が小さいためにより多くの電流が飛翔体に流れたためである。しかし、アルミニウム製飛翔体では発射速度は速いが、実験の際にしばしば火花や爆発音が発生したり、更にレールとの接触部分が大電流により融解してしまい、再度使用することが不可能であった。従って、実験ごとに飛翔体を新しいものに換えて発射実験を行わなければならなかった。これに対して、カーボン製飛翔体では、発射速度はアルミニウム製飛翔体に比べ約83%と遅いものの、実験の際に火花の発生や爆発音もほとんどなく、またレールとの接触部分も融解しておらず、同じ飛翔体を繰返し使用することができた。表3は、同じカーボン製飛翔体を用いて繰返し発射実験を行った結果である。

また、発射実験におけるカーボン製レールの温度測

表 3 発射速度計測結果
Table 3. Measurements of velocity.

Shot No.	Velocity (m/s)	
	Aluminium	Carbon
1	43.3	36.0
2	43.3	35.5
3	43.4	36.1
Average	43.3	35.9

定の結果、飛翔体の起動位置での発熱が一番高いものの、温度上昇値で2.5°C程度と実験上の問題もなく、安定実験が確保されている。一方、アルミニウム製レールでは一部融解したことから、700°C近い高温になったと考えられる。飛翔体自体の発熱はカーボン製の場合、表面温度上昇分が平均で56°Cであるのに対し、アルミニウムは一部で溶融がみられることから、局部で700°C近い高温に達していると予想できる。このことから、多段階 LAC でのアルミニウム飛翔体利用は、大いに問題となる。

以上の結果より、レールの全長を現発射装置よりも更に延長したり、多段階に飛翔体を加速させることのできる多段階発射装置の開発などの改良を行う際には、飛翔体は、電流によりレールとの接触部分が融解せず、繰返し何回も使用することができるカーボン製飛翔体が適しているということがわかった。

4. LAC の発射速度の向上

〈4・1〉 放電電流波形に対する検討 実験装置の基本回路は、図 1 に示されるように $R-L-C$ 直列回路である。従って、充電電圧・コンデンサ容量・インダクタンスなどの回路定数を変化させることにより回路に流れる放電電流の波形形状を変えることができる。このことにより飛翔体に流れる電流量を増加させ、発射速度を向上させることができる。そこで、充電電圧・コンデンサ容量・インダクタンスをそれぞれ変化させて発射実験を行った。そのときの発射速度計測結果を表 4 に示した。ただし、発射速度の測定はそれぞれ 3 回ずつ行い、その平均発射速度を同表に示した。また、この実験での放電電流波形を図 4 に示した。

同実験より、充電電圧・インダクタンスなどを一定とし、コンデンサ容量を増加させたり、コンデンサ容量やインダクタンスを一定にし、充電電圧を増加させると、飛翔体の発射速度が向上することがわかる。これは、飛翔体に流れる電流量の増加が原因であると図 4 から判断できる。また、インダクタンスの値により放電時間が変化する。すなわち、コンデンサ容量・イ

表 4 発射速度計測結果
Table 4. Measurements of velocity.

		Average velocity (m/s)			
		24		38	
Capacitance C (mF)		240		454	
Inductance L (μ H)		240		240	
Voltage V (V)	200	15.2	15.0	23.2	22.8
	250	19.8	19.7	30.3	28.4
	300	24.9	24.6	35.9	33.0

図 4 放電電流波形

Fig. 4. Discharge current waveforms.

ンダクタンスの値から LAC のレール長に見合った放電電流の選択が可能である。具体的には、飛翔体が有効磁界領域内に移動している時間のみ、放電電流を流入すればよい。多段階化の場合には、各段に飛翔体が入る速度が異なることから、放電時間は後段ほど短く、大電流を供給する必要がある。これは、多段階加速型 LAC の設計に際し、飛翔体の速度に見合った回路定数の選定が必要であることを意味する。

以上のことより、著者らは現装置において、カーボン製飛翔体を使用した場合のより最適な回路定数として、充電電圧 $V=300$ V、コンデンサ容量 $C=38$ mF、インダクタンス $L=240$ μ H を選定した。このとき発射速度は 36 m/s を得た。

〈4・2〉 多段階加速型 LAC による検討 本 LAC の織機用シャトルへの応用を考えた場合、質量 100 g のシャトルを速度 50 m/s で発射させなければならならず、さらなる発射速度の向上が望まれる。そこで、著者らは、更に発射速度を向上させるために、飛翔体を段階的に加速させることのできる多段階加速型 LAC を考案した。実際に設計・製作した二段階加速型 LAC の片側断面図を図 5 に示した。また、その諸量を表 5 に示した。この二段階加速型 LAC は、原理的には発射装置が 1 段のときと同じで、電流と磁界との間に働く力を利用したものである。また、この 2 段目の発射

図 5 二段階加速型 LAC の片側断面図
Fig. 5. Cutaway view of double-stage type LAC.

図 6 放電電流波形 (二段階加速型 LAC)
Fig. 6. Discharge current wave form (double-stage type LAC).

表 5 二段階加速型 LAC の諸量
Table 5. Specifications of double-stage type LAC.

Mechanical		
Items	Values (Unit)	
Launcher	Size	140×96×320 mm
	Rail length	300 mm
	Rail material	Carbon
	Gap length	7 mm
	Flux density	0.678 T
Projectile	Material	Carbon
	Size	50.0×3.7×21.3 mm
	Mass	6.97 g
Electrical		
Items	Values (Unit)	
Circuit resistance R_1/R_2	57.7/41.6 mΩ	
Capacitance/Withstand voltage	38/350 mF/V	
Inductance of coil L_1/L_2	240/70 μH	
Supply voltage	0~350 V	

表 6 発射速度計測結果 (二段階加速型 LAC)
Table 6. Measurements of velocity (double-stage type LAC).

Shot No.	Velocity (m/s)	
	First stage	Second stage
1	48.9	73.9
2	47.6	72.9
3	50.0	73.0
Average	48.8	73.3

装置の構造は 1 段目の発射装置とまったく同一であるが、電気的にはそれぞれ独立しており、各々に放電用の R - L - C 直列回路が設けられている。

さらなる発射速度向上を目指し、二段階加速型 LAC を用いて発射実験を行った。そのときの 1 段目の発射装置を発射するときの速度と、2 段目の速度を表 6 に示した。ここで、投入エネルギーは、発射装置

1 段目・二段目とも同じである。同表より、発射装置を 2 段にすることにより発射速度が約 1.5 倍向上していることがわかる。また、図 6 に LAC の 1 段目の放電電流波形と 2 段目の放電電流波形をそれぞれ示した。1 段目・2 段目ともに、飛翔体が有効磁界領域を発射するのとはほぼ同一時間に、放電電流が流れきっていることが判断できる。これより、1 段目および 2 段目の LAC の回路定数の選択が妥当であることが判断できる。

5. LAC の実用化に向けての検討

発射装置を 2 段にすることにより、飛翔体の発射速度を約 73.3 m/s へと向上させることができた。しかしながら、そのときの飛翔体の質量は約 7 g と非常に軽く、織機用シャトルの要求仕様であるシャトルの質量 100 g と比較して 1/10 以下の質量でしかない。そこで、現発射装置での質量 100 g の飛翔体を用いた実験は不可能なので、シミュレーション計算により実用化への対策を検討する。具体的には、飛翔体に重りを付けて、質量を増加させたときの発射速度特性を測定することで、実機への適応性についての検討を行う。

発射実験は二段階加速型 LAC を用い、使用する飛翔体はカーボンのみでできた質量約 7 g の飛翔体を基準に、更に重りを付けた 8, 9, 10 g を用い、飛翔体の質量以外は同一条件のもとで行う。そのときの測定条件としては、充電電圧 $V=350$ V、コンデンサ容量 $C=38$ mF、発射装置 1 段目のコイルのインダクタンス $L_1=240$ μH、発射装置 2 段目のコイルのインダクタンス $L_2=70$ μH で、測定は各々 5 回ずつ行った。そのときの 5 回の平均発射速度計測結果を表 7 に示し、それぞれの平均発射速度と飛翔体質量の関係をグラフ化したものを図 7 に示す。

表 7 発射速度計測結果
Table 7. Measurements of velocity.

Mass (g)	Average velocity (m/s)	
	First stage	Second stage
7	48.8	73.3
8	42.2	69.7
9	39.0	64.8
10	33.1	57.4

図 7 発射速度-質量特性
Fig. 7. Velocity-mass characteristics.

前述の結果より、飛翔体の質量を増加させていくと、発射速度は減少していくことがわかった。飛翔体質量 10 g のときにも要求仕様の速度 50 m/s を満足しているが、質量が要求仕様の 1/10 と非常に軽い。そこで、発射装置を更につなぎ合わせ、質量 100 g のシャトルを速度 50 m/s で発射させることのできる多段階加速型 LAC について検討を行う。

現在、質量 10 g の飛翔体を約 57 m/s で発射させることが可能である。従って、質量 100 g の飛翔体を 50 m/s で発射させるためには、装置の能力を現在の 10 倍にすればよい。例えば、同一構造の発射装置を 20 段つなぎ合わせればよいことになる。しかし、発射装置を 20 段もつなぎ合わせると装置が大型化され、あまり実用的ではない。

そこで、発射装置を大型化せずに、要求仕様を満足させるためには、超電導磁石の利用やコンデンサ容量の充電電圧の増加による対応がより有効となろう。

6. あとがき

著者らは、織機用シャトルへの応用を考慮した LAC を設計・製作し、特性の安定化と発射速度の向上に関する各種の発射実験を行った。

高速で移動する飛翔体への集電の安定化について

は、レール部材の種類・配置や飛翔体などの各種改良を行い、安定発射の条件をほぼ把握するに至った。飛翔体の発射速度の向上については、放電電流波形の観測からコイル L やコンデンサ C の値の最適化を行ったが、織機用シャトルの要求仕様を満足するレベルに至らなかった。そこで著者らは、さらなる発射速度の向上を目指し、多段階加速型 LAC を考案した。まず、発射装置を 2 段組み合わせた二段階加速型 LAC を設計・製作し、各種発射実験を行った。その結果、質量 10 g の飛翔体を速度 57.4 m/s で発射させることに成功した。

今後は、さらなる LAC の改良・技術の発展により、織機用シャトルの要求仕様である、質量 100 g の飛翔体を速度 50 m/s で発射させることが可能である多段階加速型 LAC が実用化されることを期待する。

最後に、本研究を進めるにあたり、実験装置の設計・製作に多大なる御協力をいただいた日立金属(株)磁材事業部技術部部长 田中省吾氏をはじめ、日立金属(株)熊谷工場の皆様に対して感謝の意を表する次第である。また、卒業研究として本研究の一部に従事された築嶋賢次、中西明子の諸君に謝意を表す。

(平成 5 年 3 月 8 日受付, 同 5 年 6 月 28 日再受付)

文 献

- (1) 山田 一: リニアモータ応用ハンドブック, p. 86 (昭 61) 工業調査会
- (2) 山田 一: 同上, p. 124 (昭 61) 工業調査会
- (3) 正田英介: リニアドライブ技術とその応用, p. 244 (平 3) オーム社
- (4) 穴原明司, 他: 「織機用シャトルのリニアモータ駆動」, 平元電気学会会誌, No. 674, p. 6-107
- (5) 山田 一: リニアモータ応用ハンドブック, p. 224; 235 (昭 61) 工業調査会
- (6) 薄葉 州, 他: 「超高速飛翔体加速装置の開発と衝突核融合」, 物理学誌, 38, No. 8, 666 (昭 58)
- (7) Shu Usuba, et al.: "DEVELOPMENT OF RAILGUN ACCELERATOR COMBINED WITH TWO-STAGE LIGHT GAS GUN", *IEEE Trans. Magnetics*, MAG-20, No. 2, 260 (1984)
- (8) 海老原・長嶋, 他: 「リニアアクセラレータの高性能化に関する基礎研究」, 電気学会リニアドライブ研資, LD-92-20, 33 (平 4)
- (9) D. Ebihara, K. Nagashima, et al.: "BASIC STUDY ON THE LINEAR ACCELERATOR", *IEEE AMC '92*, p. 45 (1992)
- (10) D. Ebihara, K. Nagashima, et al.: "BASIC STUDY ON LINEAR ACCELERATOR", *IEE JAPAN-IAS '92*, No. E. 2-2, 26 (1992)
- (11) 海老原・長嶋, 他: 「リニアアクセラレータに関する基礎研究」, 平 3 電気学会産業応用部門会誌, No. 270, 1143
- (12) 海老原・長嶋, 他: 「リニアアクセラレータの発射速度向上に対する基礎研究」, 第 4 回シンポジウム電磁力関連のダイナミクス, No. 509, 145 (平 4)
- (13) 山上・田中・奥井・山田: 「ソレノイド形電磁ランチャによる鋼球の飛翔速度特性」, 電学論 D, 112, 1214 (平 4-12)
- (14) 電気学会磁気アキュエータ調査専門委員会: リニアモータとその応用, p. 205 (昭 59) 電気学会

海老原 大 樹 (正員)

昭和13年11月21日生。37年武蔵工業大学卒業。42年同大学電気工学助手、49年同講師、62年同助教授、平成5年4月同教授、現在に至る。各種リニアモータの磁界解析および開発に関する研究に従事。工学博士。IEEE, 日本 AEM 学会会員。

和多田 雅 哉 (正員)

昭和36年9月4日生。59年3月武蔵工業大学電気工学科卒業。同年4月(株)アマダ入社。技術研究所にてリニアアクチュエータの研究開発に従事。63年4

月武蔵工業大学電気電子工学科技術員、平成3年同技士補、現在に至る。IEEE 会員。

長 嶋 健 二 (准員)

昭和43年12月11日生。平成5年3月武蔵工業大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月ソニー(株)入社、現在に至る。